

基于多模态储能耦合的锅炉主汽温度深度调峰控制策略研究

张建江

杭州众工电力科技有限公司 310051

【摘要】在当下电力系统深度调峰需求愈发显著的大环境中，锅炉主汽温度控制遭遇了前所未有的艰难处境。随着可再生能源的大规模接入以及电力负荷峰谷差的持续拉大，锅炉燃烧工况频繁且剧烈变化，传统控制策略在应对这些变化时显得捉襟见肘，难以实现快速、精准的温度调节，这给电力系统的安全稳定运行带来了巨大挑战。为了有效解决这一问题，本文创新性地提出了一种基于多模态储能耦合的深度调峰控制策略。该策略独具匠心，通过引入全新的减温器设计以及多模态储能系统，为锅炉主汽温度控制带来了新的解决方案。研究过程中，团队首先对锅炉主汽温度控制的现状与所面临的挑战进行了全面且深入的剖析。随后，详细阐述了减温器的结构特点、工作原理，同时深入探讨了多模态储能系统在深度调峰中的实际应用。通过大量的仿真与实验验证，充分证明了所提策略在提升锅炉主汽温度控制精度、响应速度以及系统稳定性方面展现出了显著优势，为电力系统深度调峰提供了有力的技术支持，具有广阔的应用前景。

【关键词】多模态储能耦合；锅炉主汽温度；深度调峰控制；减温器；储能系统

Boiler main steam temperature based on multimodal energy storage coupling Research on deep peak control strategy

Zhang Jianjiang

Hangzhou Zhonggong Electric Power Technology Co., LTD 310051

【Abstract】In the current environment where deep peak regulation demands in power systems are becoming increasingly prominent, boiler main steam temperature control is facing unprecedented challenges. With the large-scale integration of renewable energy and the continuous widening of the power load peak-to-valley difference, boiler combustion conditions are frequently and dramatically changing. Traditional control strategies fall short when dealing with these changes, making it difficult to achieve rapid and precise temperature adjustments. This poses significant challenges to the safe and stable operation of power systems. To effectively address this issue, this paper innovatively proposes a deep peak regulation control strategy based on multimodal energy storage coupling. This strategy is ingenious, introducing a new damper design and a multimodal energy storage system to bring about a new solution for boiler main steam temperature control. During the research process, the team first conducted a comprehensive and in-depth analysis of the current status and challenges faced in boiler main steam temperature control. Subsequently, they detailed the structural characteristics and working principles of the damper, while also delving into the practical application of multimodal energy storage systems in deep peak regulation. Through extensive simulation and experimental validation, it has been fully demonstrated that the proposed strategy exhibits significant advantages in improving the accuracy, response speed, and system stability of boiler main steam temperature control. It provides strong technical support for deep peak regulation in power systems and holds broad application prospects.

【Key words】multimodal energy storage coupling; boiler main steam temperature; deep peak regulation control; temperature reducer; energy storage system

1 引言

随着全球能源结构的转型与可再生能源的大规模接入，电力系统正经历着深刻的变革。可再生能源的间歇性与波动性使得电网的峰谷差日益增大，对传统火电机组的调峰能力提出了更高要求。锅炉主汽温度作为火电机组运行的关键参数之一，其稳定控制对于保障机组安全、高效运行至关重要。然而，在深度调峰工况下，锅炉燃烧工况的剧烈变化导致主汽温度波动范围显著增大，传统控制策略难以满足快速、精准的温度调节需求。因此，研究一种基于多模态储能耦合的锅炉主汽温度深度调峰控制策略具有重要的现实意义与工程应用价值。

2 锅炉主汽温度控制现状与挑战

2.1 锅炉主汽温度控制现状

目前，锅炉主汽温度控制主要采用减温水调节方式，即通过调节减温水量来控制主汽温度。然而，这种控制方式存在诸多弊端。一方面，减温水管道长、阀门动作慢，导致减温水调节存在较大的延迟；另一方面，传统控制策略往往采用PID控制，难以适应燃烧工况的剧烈变化，导致主汽温度超调量大、调节品质差。特别是在深度调峰工况下，这些问题更为突出，严重影响了机组的安全运行与经济效益。

2.2 锅炉主汽温度控制面临的挑战

在深度调峰工况下，锅炉主汽温度控制面临着诸多挑战。具体表现为以下几个方面：

(1) 调节延迟大：减温水管道长、阀门动作慢等因素导致减温水调节存在较大的延迟，使得主汽温度难以快速响应燃烧工况的变化。

(2) 超调量大: 传统 PID 控制策略在应对燃烧工况剧烈变化时难以准确预测主汽温度的变化趋势, 导致超调量大, 甚至可能引发机组跳闸等安全事故。

(3) 调节品质差: 在深度调峰工况下, 主汽温度波动范围增大, 传统控制策略难以保证主汽温度的稳定控制, 导致机组运行效率低下、能耗增加。

3 多模态储能耦合的深度调峰控制策略

3.1 多模态储能系统概述

多模态储能系统, 作为一种前沿的能源存储解决方案, 指的是将多种储能技术, 如电池储能、超级电容储能以及飞轮储能等, 有机整合于一体的复合型储能系统。这一创新设计使得系统能够灵活应对电网的多样化需求, 无论是高峰时段的电能补充, 还是低谷时段的电能储存, 都能迅速且精准地实现电能的存储与释放, 从而显著提升电力系统的调峰能力和整体稳定性。

相较于传统的单一储能方式, 多模态储能系统展现出了无可比拟的优势。它不仅具备更高的能量密度, 意味着在相同体积或重量下能存储更多电能, 还拥有更快的响应速度, 能在毫秒级时间内对电网变化做出反应。此外, 其更长的使用寿命也大大降低了维护成本和更换频率, 为电力系统的长期稳定运行提供了有力保障。因此, 多模态储能系统正逐渐成为未来智能电网建设的关键技术之一, 引领着能源存储领域的新一轮变革。

3.2 多模态储能耦合的深度调峰控制策略

针对锅炉主汽温度控制面临的挑战, 本文提出了一种基于多模态储能耦合的深度调峰控制策略。该策略通过引入多模态储能系统, 实现对锅炉燃烧工况的快速调节, 从而减小主汽温度的波动范围。具体实现方式如下:

(1) 建立多模态储能系统模型: 根据锅炉燃烧工况的特点, 建立多模态储能系统的数学模型, 包括电池储能、超级电容储能、飞轮储能等。通过仿真分析不同储能方式在调峰过程中的作用与贡献, 为制定控制策略提供理论依据。

(2) 制定控制策略: 根据电网需求和锅炉燃烧工况的变化, 制定多模态储能系统的充放电策略。例如, 在电网负荷低谷时, 利用多模态储能系统存储多余的电能; 在电网负荷高峰时, 释放存储的电能以支持电网调峰。同时, 根据主汽温度的变化情况, 动态调整储能系统的充放电功率, 实现对锅炉燃烧工况的快速调节。

(3) 优化控制参数: 通过仿真与实验验证, 不断优化控制参数, 提高控制策略的适应性和稳定性。例如, 采用先进的控制算法 (如模糊控制、神经网络控制等) 对储能系统的充放电过程进行优化控制, 以提高控制精度和响应速度。

4 减温器设计

4.1 减温器设计概述

减温器作为锅炉主汽温度控制体系中不可或缺的关键设备之一, 其核心功能在于通过精准喷洒冷却水, 有效调控并降低主蒸汽的温度, 确保锅炉系统在高效、安全的状态下运行。然而, 传统减温器在设计上存在一些固有的局限性,

如喷淋量相对较小, 难以在短时间内实现大范围的温度调节; 同时, 喷淋面积分布不均匀, 导致部分区域温度控制失效或过度冷却, 这些问题在深度调峰工况下尤为突出, 严重制约了锅炉系统的灵活性和稳定性。

针对传统减温器的这些不足, 本文提出了一种创新的减温器设计方案。该方案从优化喷淋结构、增强冷却水分布均匀性、提升调节响应速度等多个维度入手, 旨在通过技术创新手段, 显著提高减温器的减温效率与运行稳定性。通过这一创新设计, 不仅能够更好地满足深度调峰工况下的温度调节需求, 还能为锅炉系统的整体优化和能效提升提供有力支持。

4.2 减温器结构特点

为解决传统减温器存在的问题, 本文设计的减温器包括减温器筒身、入水管、环形水管及喷嘴等部件。具体结构特点如下:

(1) 减温器筒身: 采用高强度材料制成, 具有良好的耐高温、耐腐蚀性能。筒身内部光滑无死角, 便于冷却水的流动与热交换。

(2) 入水管: 设置在减温器筒身的顶端中部, 贯穿筒身并延伸至内部。入水管的侧部上端设置有冷却水进口, 便于冷却水的引入。入水管的设计考虑了水流动力学原理, 确保冷却水能够均匀、快速地流入环形水管。

(3) 环形水管: 设置在减温器筒身的内部, 其入水端与入水管连接。环形水管的侧部设置有若干喷嘴, 用于喷洒冷却水。环形水管的设计使得冷却水能够均匀分布到各个喷嘴, 提高喷洒的均匀性。

(4) 喷嘴设计: 喷嘴采用特殊设计, 能够实现均匀、高效的喷洒效果。环形外管和环形内管的喷嘴同时喷出冷却水, 通过调整喷嘴的角度和间距, 有效增大喷淋量和喷淋面积。喷嘴内部设置有导流装置, 使得冷却水能够以一定的角度和速度喷出, 形成均匀的喷洒面。

4.3 减温器工作原理

当锅炉主汽温度超过设定范围时, 控制系统启动减温器。冷却水通过入水管进入环形水管, 然后通过喷嘴喷洒到减温器筒身内部。喷洒的冷却水与高温蒸汽进行热交换, 从而降低主汽温度。在热交换过程中, 冷却水吸收蒸汽的热量并汽化, 形成水蒸气与蒸汽混合物。当主汽温度达到设定范围时, 控制系统关闭减温器, 停止冷却水的喷洒。

5 技术实现细节

5.1 多模态储能系统技术实现

(1) 电池储能: 采用先进的电池技术 (如锂离子电池、铅酸电池等), 实现电能的存储与释放。通过电池管理系统 (BMS) 对电池进行监控和管理, 确保电池的安全、高效运行。BMS 能够实时监测电池的电压、电流、温度等参数, 并根据电池状态调整充放电策略, 延长电池使用寿命。

(2) 超级电容储能: 利用超级电容器的快速充放电特性, 实现对锅炉燃烧工况的快速调节。超级电容管理系统 (SCMS) 对超级电容进行监控和管理, 提高其使用寿命和效率。SCMS 能够实时监测超级电容的充放电状态, 并根据需求调整充放电功率, 确保超级电容能够快速响应电网需求。

(3) 飞轮储能: 采用高速飞轮储能技术, 实现对电能的高效存储与释放。飞轮储能系统 (FESS) 通过控制飞轮

的转速和功率,实现对电能的高效存储与利用。FESS 具有响应速度快、能量密度高、使用寿命长等优点,适用于电网调峰、电能质量改善等领域。

5.2 减温器技术实现细节

(1) 喷嘴设计:喷嘴采用特殊结构设计,能够实现均匀、高效的喷洒效果。环形外管和环形内管的喷嘴同时喷出冷却水,通过调整喷嘴的角度和间距,有效增大喷淋量和喷淋面积。喷嘴内部设置有导流装置和过滤装置,确保冷却水能够以一定的角度和速度喷出,并过滤掉水中的杂质和颗粒物。

(2) 冷却水引入与分配:冷却水通过入水管引入环形水管,在喷洒前可设置一个小的缓冲腔室,使冷却水更均匀地分布到各个喷嘴。缓冲腔室的设计考虑了水流动力学原理,确保冷却水能够平稳、均匀地流入环形水管。

(3) 热交换过程优化:在减温器筒身内部,可设置一些扰流装置(如螺旋形扰流板),增强冷却水与高温蒸汽的热交换效果。扰流装置能够增加冷却水与蒸汽的接触面积和接触时间,提高热交换效率。同时,扰流装置还能够减缓蒸汽的流动速度,使得蒸汽能够更充分地与冷却水进行热交换。

6 仿真与实验验证

6.1 仿真验证

为验证所提控制策略的有效性,本文采用 MATLAB/Simulink 软件建立了锅炉主汽温度控制系统的仿真模型。在仿真模型中,引入了多模态储能系统和创新的减温器设计,并对不同工况下的主汽温度控制效果进行了仿真分析。仿真结果表明,所提控制策略能够显著提高主汽温度的控制精度和响应速度,减小温度波动范围。

在仿真过程中,我们模拟了不同电网负荷需求和锅炉燃烧工况下的主汽温度变化情况。通过调整多模态储能系统的充放电功率和减温器的喷水量,实现了对主汽温度的精准控制。仿真结果显示,在深度调峰工况下,所提控制策略能够将主汽温度波动范围控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内,显著优于传统控制策略。

6.2 实验验证

为进一步验证所提控制策略的实际应用效果,本文在一台实际运行的火电机组上进行了实验验证。实验过程中,通过调整锅炉燃烧工况和电网负荷需求,模拟了深度调峰工况下的主汽温度控制过程。实验结果表明,所提控制策略在实际应用中同样表现出良好的控制效果,能够满足深度调峰工

况下的主汽温度控制需求。

在实验过程中,我们记录了不同工况下的主汽温度、减温器喷水量、多模态储能系统充放电功率等参数。通过对实验数据的分析,我们发现所提控制策略能够快速响应燃烧工况的变化,实现对主汽温度的精准控制。同时,实验结果还表明,所提控制策略具有较高的稳定性和可靠性,能够满足火电机组长期运行的需求。

7 结论

本文针对当前电力系统深度调峰需求下锅炉主汽温度控制面临的挑战,提出了一种基于多模态储能耦合的深度调峰控制策略。该策略通过引入一种创新的减温器设计,结合多模态储能系统,实现了对锅炉主汽温度的精准、高效控制。通过仿真与实验验证,证明了所提策略在提升锅炉主汽温度控制精度、响应速度及系统稳定性方面具有显著优势。

具体结论如下:

(1) 所提减温器设计通过环形外管和环形内管的喷嘴同时喷出冷却水,有效增大了喷淋量和喷淋面积,提高了减温效率。

(2) 多模态储能系统的引入使得锅炉燃烧工况能够根据电网需求进行快速调节,从而减小了主汽温度的波动范围。

(3) 所提控制策略在仿真与实验验证中均表现出良好的控制效果,能够满足深度调峰工况下的主汽温度控制需求。

未来的研究将聚焦于多个关键领域,以推动相关技术的进一步发展。首先,在减温器设计与多模态储能系统控制策略方面,我们将致力于进一步优化现有技术。这包括深入分析减温器的工作原理,通过改进材料选择和结构设计,提升其热交换效率与耐用性。同时,针对多模态储能系统,我们将探索更加智能化的控制算法,以实现不同储能模式间的无缝切换与高效协同,从而显著提高系统的适应性和稳定性。

此外,人工智能技术在锅炉主汽温度控制领域的应用将成为研究的新热点。通过引入机器学习算法,我们可以对海量历史数据进行深度挖掘与分析,从中提取出影响温度控制的关键因素,进而优化控制策略,实现更加精准、快速的温度调节。

在能源管理与交易方面,区块链技术展现出巨大潜力。我们计划将其应用于多模态储能系统的能量管理与交易中,利用区块链的去中心化、不可篡改等特性,确保能源交易的透明性与安全性,同时优化能源分配,提高整体能源利用效率,增强市场竞争力。

参考文献

- [1]曹韵.规模化储能与多能源耦合系统优化调度模型与方法研究[D].贵州:贵州大学,2023.
- [2]魏海蛟,鹿院卫,刘金恺,等.基于储热的燃煤机组深度调峰规模化消纳可再生能源发电研究[J].热力发电,2023,52(2):79-89.DOI: 10.19666/j.rld.202210251.
- [3]孔令超.锅炉主蒸汽温度优化控制方法研究[D].吉林:长春工业大学,2020.
- [4]西安热工研究院有限公司,西安西热锅炉环保工程有限公司.电站锅炉高温烟气耦合再热蒸汽储热深度调峰系统及方法:CN202010917835.9[P].2020-11-13.
- [5]葛铮,吴林峰.基于模糊PID控制的锅炉主蒸汽温度控制策略研究[J].黑龙江电力,2018,40(4):358-361.